

El acero inoxidable en la construcción; un material sostenible y de futuro

Stainless Steel in construction; a sustainable and future material

Esther Real, Profesora Titular de Universidad, Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos

Itsaso Arrayago, Investigadora postdoctoral, Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos

Enrique Mirambell, Catedrático de Universidad, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya, España

Resumen

Este artículo presenta un resumen de las estrategias de diseño adecuadas y los conocimientos sobre el material necesarios para el proyecto de estructuras de acero inoxidable, a través de la presentación de la cuarta edición del Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural, a ingenieros y arquitectos que quieran utilizar las ventajas de las propiedades técnicas del material y emplearlo para el proyecto de estructuras atractivas, funcionales y económicas. Contiene además un resumen de las diferencias básicas con el cálculo en acero al carbono y nuevas guías para la selección de grados. Finalmente, se describen algunas aplicaciones recientes en España.

Abstract

This article provides a brief summary of the most relevant design strategies and material properties for the design of stainless steel structures using the new version of the Design Manual for Structural Stainless Steel, for engineers and architects who want to use the advantages of this material to design aesthetic, functional and economic structures. The article summarizes the basic differences compared to the design in carbon steel and guidance on grade selection are provided. Finally, some recent structural applications of stainless steels in Spain are described.

Palabras clave / Keywords

Acero inoxidable, Construcción, Diseño, Normativa

Stainless Steel, Construction, Design, Standard

1. Introducción

El acero inoxidable se ha empleado en aplicaciones de edificación desde su invención debido a su inherente resistencia a la corrosión proporcionada por una capa protectora que se genera de manera espontánea en su superficie. Esto hace que los componentes de acero inoxidable puedan ser expuestos a una variedad de ambientes sin la necesidad de aplicar recubrimientos de protección, resultando ideales en ambientes agresivos. Cuentan con una buena resistencia mecánica, tenacidad y resistencia frente a fatiga, por lo que pueden emplearse en multitud de aplicaciones estructurales como vigas, pilares, plataformas y apoyos en instalaciones industriales y puentes; diques de abrigo, muelles y estructuras costeras; barras de armado en estructuras de hormigón; estructuras resistentes a explosiones, impacto e incendio.

El acero inoxidable es más caro y de precio más volátil que el acero al carbono al depender del coste de los elementos de aleación. No obstante, al considerar los costes de ciclo de vida (costes iniciales, de mantenimiento, sustitución e interrupciones de servicio, etc.) a la hora de seleccionar los materiales de construcción, el acero inoxidable puede resultar más rentable en algunos casos. Tiene además un

alto valor residual y puede reciclarse indefinidamente.

Aunque comparte algunas características con el acero al carbono, su comportamiento tenso-deformacional es diferente, lo cual influye en el comportamiento mecánico del material y requiere de algunas expresiones de diseño diferentes. Por ello, la norma europea del acero inoxidable EN1993-1-4:2006 (1) y la correspondiente versión española UNE-EN1993-1-4:2012 (2), recogen estas reglas adicionales que modifican y suplementan las reglas para el acero al carbono cuando es necesario, así como el *Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural* (3), en sintonía con lo recogido en la versión recientemente actualizada de la norma europea EN1993-1-4+A1:2015 (4).

2. Características del acero inoxidable

Los aceros inoxidables presentan un contenido mínimo en cromo de 10,5%, el cual forma una capa transparente y adherente de óxido rico en cromo en la superficie del acero cuando se expone a cualquier ambiente oxidante. Son materiales altamente versátiles con diferentes resistencias mecánicas y a la corrosión que suelen clasificarse en cinco grupos: austeníticos, martensíticos, ferríticos, dúplex y de endurecimiento por precipitación, aunque los más empleados en la construcción son los austeníticos y los dúplex, debido a sus propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, trabajabilidad y soldabilidad. No obstante, los grados ferríticos se postulan también como excelente alternativa frente al acero galvanizado, dada su moderada resistencia a la corrosión y su precio inicial más reducido y estable.

El comportamiento tenso-deformacional del acero inoxidable es diferente al del acero al carbono, el cual se comporta linealmente hasta su límite elástico y mantiene una zona plana de tensión constante antes del endurecimiento por deformación, tal como puede apreciarse en la Figura 1. Los aceros inoxidables muestran curvas redondeadas sin límite elástico claramente definido, además de un importante endurecimiento por deformación y una ductilidad alta. La manera convencional de definir el límite elástico de cálculo para materiales de comportamiento no lineal como el acero inoxidable es la de adoptar la tensión correspondiente a una deformación plástica remanente del 0,2%.

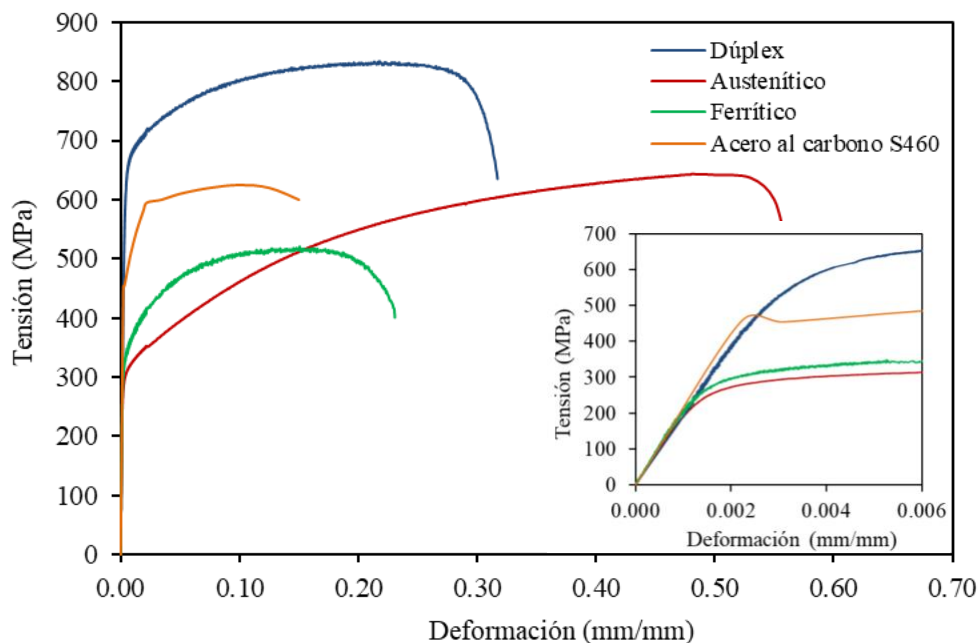


Figura 1 Curvas tensión-deformación para grados típicos de acero inoxidable y acero al carbono

En general, los aceros inoxidables cuentan con una serie de propiedades que los coloca en una

situación inmejorable para estructuras sometidas a acciones accidentales, como una mayor relación resistencia última/límite elástico, mayor capacidad de absorción de energía y gran ductilidad. Otra de las excelentes características de los aceros inoxidables es su buen comportamiento a altas temperaturas, ya que pierden resistencia y rigidez a una velocidad menor a la del acero al carbono a medida que aumenta la temperatura, pudiendo retener su capacidad resistente durante mayores periodos de tiempo que los elementos equivalentes de acero al carbono.

3. Durabilidad y criterios para la selección de grados

Los aceros inoxidables son resistentes a la corrosión y se comportan satisfactoriamente en la mayoría de ambientes que ocurren de manera natural. No obstante, pueden ocurrir fenómenos de corrosión local si el grado seleccionado es inadecuado, o se ve expuesto a condiciones inesperadas. Generalmente es difícil encontrar elementos con corrosión uniforme, y aunque pueden aparecer superficies manchadas, es improbable que la integridad estructural se vea comprometida. La medida más importante a tomar para prevenir estos problemas es seleccionar adecuadamente el grado para el ambiente previsto y definir detalles constructivos apropiados. La resistencia a la corrosión del acero inoxidable depende de sus elementos constituyentes, y el coste del material aumenta cuanto mayor sea el nivel de resistencia a la corrosión, por lo que resulta necesario seleccionar el grado de acero inoxidable más apropiado.

Las actualizaciones de EN1993-1-4 (1) y el *Manual de Diseño* (3) incluyen un procedimiento para la selección de grados: determinar el Factor de Resistencia a la Corrosión (FRC) relativo al ambiente (en función del riesgo de exposición a cloruros, a dióxido de azufre y del régimen de limpieza establecido), el cual indicará la Clase de Resistencia a la Corrosión (CRC) necesaria para garantizar la integridad estructural. Los diferentes grados se clasifican en cinco CRC, siendo la CRC V la más durable y la elección final de un grado específico dentro la CRC dependerá de otros factores como la resistencia mecánica y la disponibilidad del producto. Así, el proyectista deberá especificar el material de acuerdo con la CRC y la resistencia de cálculo, p.e. CRC II y $f_y=450$ N/mm².

4. Cálculo estructural para el acero inoxidable

4.1 Normas, Manual de Diseño y recursos para el cálculo

La creciente demanda de estructuras de acero inoxidable ha fomentado el desarrollo de normas y guías de cálculo en el ámbito internacional. Aunque el cuerpo de doctrina del acero inoxidable es similar al del acero al carbono, las diferencias en el comportamiento tenso-deformacional y en la distribución y nivel de tensiones residuales hacen que no sean directamente aplicables muchos de los procedimientos de la resistencia de materiales y el cálculo de estructuras, empleados habitualmente para el acero al carbono.

La norma europea del acero inoxidable, EN1993-1-4:2006 (1), recoge las reglas suplementarias en aquellos apartados en los que las proporcionadas para acero al carbono no son aplicables. El incremento significativo de los trabajos de investigación sobre el comportamiento del acero inoxidable ha demostrado que algunas de las reglas recogidas en (1) resultaban muy conservadoras y de alcance limitado. Como resultado, se han propuesto mejoras en la versión EN1993-1-4+A1:2015 (4), permitiendo un cálculo menos conservador que resulta esencial debido al alto coste inicial en relación con el del acero al carbono, pero dejando obsoletos varios recursos existentes para la utilización de dicha norma.

Por ello, se ha preparado una nueva colección de recursos de diseño en el marco del proyecto de

diseminación europeo PUREST, Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steel (5), financiado por la Research Fund for Coal and Steel de la Unión Europea, en el que han participado varios socios europeos durante 18 meses. Además de la actualización y extensión del *Manual de Diseño* (3) y su traducción a 9 idiomas, se ha desarrollado un software de cálculo y aplicaciones para dispositivos móviles, se han organizado seminarios y grabado webinars para formación a distancia. Todos estos recursos están disponibles en www.steel-stainless.org/designmanual.

4.2 Consideraciones específicas para el proyecto en acero inoxidable

El comportamiento no lineal del acero inoxidable afecta al dimensionamiento y/o comprobación de elementos estructurales en aspectos como la abolladura local, la inestabilidad global y el cálculo de flechas. No obstante, se emplean los mismos procedimientos básicos que para el acero al carbono, aunque deberán tenerse en cuenta algunas diferencias que se resumen a continuación. Los coeficientes parciales de seguridad establecidos son ligeramente superiores a los de acero al carbono ($\gamma_{M0}=1,10$, $\gamma_{M1}=1,10$ y $\gamma_{M2}=1,25$ frente a $\gamma_{M0}=1,00$, $\gamma_{M1}=1,00$ y $\gamma_{M2}=1,25$) y a la hora de calcular las resistencias mecánicas se adoptan los valores mínimos especificados del límite elástico y resistencia última a tracción.

Clasificación de secciones y cálculo de anchos eficaces

Las secciones transversales de acero inoxidable se clasifican también en cuatro, y debe seguirse el mismo procedimiento que para acero al carbono. Se establecen los mismos límites ancho/espesor excepto para los elementos internos comprimidos de las secciones Clase 2 y 3. La definición del parámetro ε es también diferente para tener en cuenta el diferente valor del módulo de Young. Para el cálculo de los anchos eficaces en secciones Clase 4, el procedimiento a seguir es también idéntico, variando la expresión para el cálculo del factor de reducción en elementos internos comprimidos.

Pandeo por flexión, pandeo lateral y verificación de elementos

La verificación frente a pandeo por flexión en pilares y frente a pandeo lateral de vigas de acero inoxidable puede realizarse mediante los mismos procedimientos que para acero al carbono. No obstante, deberán emplearse diferentes curvas de pandeo, con la misma forma matemática que las recogidas para el acero al carbono, pero con factores de imperfección y esbelteces límite diferentes (que dependen del tipo de sección transversal, modo de pandeo, proceso de fabricación y grado). Los elementos flexocomprimidos se verifican también a partir de expresiones análogas a las de acero al carbono, pero con factores de interacción diferentes.

Uniones atornilladas y soldadas

Para las uniones atornilladas aplican las reglas de cálculo para acero al carbono, aunque para la resistencia de las partes unidas aplican reglas especiales de acero inoxidable y deberá garantizarse la resistencia a la corrosión de la unión. Actualmente no existen reglas de cálculo para tornillos pretensados de acero inoxidable aunque trabajos de investigación recientes han demostrado que los tornillos de aceros dúplex y austeníticos pueden pretensarse satisfactoriamente, siempre que se emplee el grado, método de apriete y lubricante adecuados.

También para las uniones soldadas de acero inoxidable deben aplicarse las mismas reglas de cálculo que para acero al carbono, aunque resulta esencial el empleo de procedimientos adecuados, soldadores cualificados y consumibles compatibles.

Cálculo de flechas

Debido a la no linealidad de la curva tenso-deformacional las flechas son ligeramente superiores para

los aceros inoxidables que para acero al carbono. Una manera conservadora de estimar estas flechas es usar la teoría estándar de vigas utilizando el módulo secante E_s para la máxima tensión del elemento en servicio en lugar del módulo de Young. De manera simplificada, puede despreciarse la variación de E_s a lo largo del elemento y adoptar el valor mínimo, procedimiento que resulta adecuado cuando esta máxima tensión no supere el 65% del límite elástico. Para tensiones superiores, el método resulta muy conservador y deberán utilizarse métodos más precisos.

Cálculo frente a incendio

Para calcular la resistencia frente a incendio, en general se aplicará lo establecido para acero al carbono, aunque existen algunas diferencias entre los procedimientos a emplear. Para las estructuras de acero inoxidable sometidas a la acción de incendio y en las que no haya efectos de inestabilidad (vigas arriostradas o elementos traccionados), se empleará como tensión de referencia la correspondiente a una deformación total del 2%. En cambio, para aquellos elementos estructurales en los que aparezcan fenómenos de inestabilidad (abolladura local, pandeo por flexión, o pandeo lateral), se empleará una tensión de referencia correspondiente a una deformación remanente del 0,2%. Ello se plantea en contraposición a lo asumido para acero al carbono, donde la tensión de referencia es la correspondiente al límite elástico. No obstante, la expresión de la función de resistencia adoptada para el acero inoxidable presenta el mismo formato que a temperatura ambiente, mientras que para acero al carbono la función de resistencia es menor.

Métodos avanzados de cálculo

Existen actualmente métodos avanzados de cálculo recogidos en diferentes anejos del *Manual de Diseño* (3) y con los que puede alcanzarse un cálculo y diseño más eficiente. Puede tenerse en cuenta la mejora de resistencia por efecto del conformado en frío durante los procesos de fabricación en el cálculo de resistencias de todo tipo de secciones conformadas en frío, así como el endurecimiento por deformación a través del Continuous Strength Method. Se proporcionan también directrices para la definición del material a emplear en el diseño asistido por elementos finitos, proporcionando una descripción analítica del comportamiento tenso-deformacional y el procedimiento para obtener los diferentes parámetros necesarios a partir de ensayos, tablas o ecuaciones.

5. Aplicaciones recientes en España

La pasarela de Las Águilas (Murcia), proyectada por VALTER, valenciana de estructuras S.L., es una de las más recientes realizaciones en acero inoxidable en España (Figura 2). La pasarela salva un vano de 35m mediante dos vigas principales laterales en I de canto variable y un cajón central de sección hueca rectangular, para lo que se empleó un grado dúplex EN1.4462 debido al ambiente marino y la valoración de los costes derivados del mantenimiento a lo largo de su vida útil.

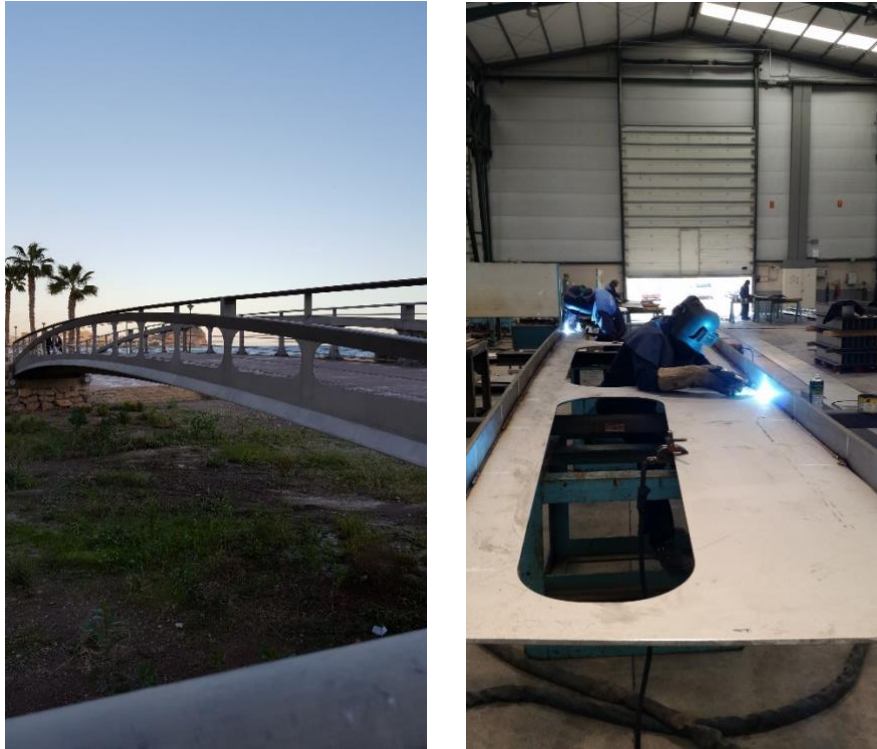


Figura 2 *Vista general de la pasarela en Las Águilas y fabricación de las viga (fotos cortesía de VALTER)*

La pasarela peatonal Pedro Arrupe en Abandoibarra (Bilbao), proyectada por IDEAM, es otra de las magníficas realizaciones en acero inoxidable en nuestro país. Fabricada en acero inoxidable dúplex EN1.4362 que proporciona la necesaria resistencia a la corrosión, y cuya elevada resistencia mecánica permitió la reducción del peso total de la estructura, presenta una longitud total de 143m con una sección transversal en forma de U y salva un vano de 84m en su zona central. La Figura 3 muestra una de las últimas etapas del proceso de elevación de la pasarela.



Figura 3 *Proceso de construcción de la pasarela de Abandoibarra en Bilbao (foto cortesía de IDEAM).*

El puente de Cala Galdana (Menorca), proyectado por Pedelta e inaugurado en 2005, fue uno de los primeros puentes en acero inoxidable en el mundo. La estructura, de una longitud total de 55m, consta de dos arcos paralelos de 6m de flecha y 45m de luz. El acero inoxidable empleado fue el grado dúplex EN1.4462 debido a su elevada resistencia mecánica y excelente resistencia a la corrosión. La Figura 4 muestra el estado del puente tras 12 años de vida útil en un entorno marítimo con un mantenimiento mínimo, donde la falta de daño por corrosión es la prueba de la correcta elección del material.



Figura 4 *Aspecto del puente tras su inauguración y después de 12 años de vida útil (fotos cortesía de Pedelta).*

Agradecimientos

Este artículo se ha desarrollado en el marco de los proyecto PUREST, “Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steel”, financiado por la RFCS de la Comisión Europea y BIA2016-75678-R, AEI/FEDER, UE, financiado por MINECO.

Referencias

- (1) CEN (2006). *EN1993–1–4:2006. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-4: General rules. Supplementary rules for stainless steels.* European Committee for Standardization (CEN).
- (2) AENOR (2012). *UNE-EN1993-1-4:2012. Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-4: Reglas generales. Reglas adicionales para los aceros inoxidables.* Asociación Española de Normalización (AENOR).
- (3) Steel Construction Institute. *Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural*, Cuarta Edición. Publicación P413, 2017.
- (4) CEN (2015). *EN1993–1–4:2006+A1:2015. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-4: General rules. Supplementary rules for stainless steels.* European Committee for Standardization (CEN).
- (5) Proyecto PUREST, Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steel. RFSR-CT-2015-70960. Financiado por la Research Fund for Coal and Steel, Comisión Europea.